

PACS numbers: 42.82. – m; 84.40.Dc

НЕРЕГУЛЯРНЫЕ КВАЗИОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОНИКИ МИЛЛИМЕТРОВЫХ ВОЛН

Г.С. Воробьев, В.О. Журба, М.В. Петровский, А.А. Рыбалко, Ю.В. Шульга

Сумский государственный университет,
ул. Римского-Корсакова, 2, 40007, Сумы, Украина
E-mail: vp@sumdu.edu.ua

В обзоре представлены основные типы и результаты исследований нерегулярных квазиоптических систем, которые находят применение в электронике и технике миллиметровых волн. Общим свойством таких систем является наличие неоднородностей, на которых происходит трансформация поверхностных волн электронных пучков (либо диэлектрических волноводов) в пространственные волны, возбуждающие заданный тип квазиоптического устройства (открытого резонатора или волновода, периодической или диэлектрической структуры и т.д.). Проведено сравнение уровня развития релятивистских и нерелятивистских электровакуумных приборов. Показана актуальность построения низковольтных усилителей и генераторов миллиметрового диапазона, включая использование планарных технологий для их микроминиатюризации. На основании обзора построена схема классификации нерегулярных квазиоптических систем и определены наиболее перспективные направления дальнейших исследований.

Ключевые слова: *НЕРЕГУЛЯРНЫЕ КВАЗИОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ, ТЕХНИКА МИЛЛИМЕТРОВЫХ ВОЛН, ПОВЕРХНОСТНЫЕ ВОЛНЫ, ОТКРЫТЫЙ РЕЗОНАТОР, ВОЛНОВОД.*

(Получено 09.04.2009, в отредактированной форме – 12.07.2009)

1. ВВЕДЕНИЕ

Электровакуумные приборы миллиметровых и субмиллиметровых (МСМ) волн широко используются при решении актуальных задач экспериментальной физики, астрономии, исследования природных ресурсов, радиолокации, в коммуникационных системах и медицине [1-3]. Возрастающие требования к параметрам электровакуумных генераторов и усилителей электромагнитных колебаний стимулировали поиск новых конструктивно-технологических решений и механизмов преобразования энергии электронного потока (ЭП) в энергию электромагнитного поля. Так, например, наряду с развитием классических приборов типа “лампа обратной волны (ЛОВ)”, “лампа бегущей волны (ЛБВ)”, “магнетрон”, “клистрон” [4-7], были предложены и развивались принципиально новые устройства, использующие радиационные эффекты: генератор дифракционного излучения (ГДИ), оротрон, черенковский генератор, мазер на циклотронном резонансе, лазер на свободных электронах [8-14]. К таким эффектам относятся черенковское и переходное излучения, а также их разновидности: индуцированное излучение, излучение Смита-Парселла (дифракционное излучение) [15-18].

Основной особенностью приборов, принцип действия которых основан на применении радиационных эффектов, является наличие нерегулярных квази-

оптических электродинамических систем, выполненных в виде открытых резонаторов (ОР) и открытых волноводов (ОВ). Такие системы являются более предпочтительными в МСМ-диапазоне за счет формирования объемных электромагнитных волн и высокоэффективной селекции мод колебаний.

Открытые резонаторы являются важнейшими элементами целого ряда устройств МСМ-волн [19-27]: резонансные волномеры, эталоны частоты, приборы для исследования свойств веществ, различные модификации генераторов и усилителей, включая полупроводниковые генераторы на диодах Гана и ЛПД [28, 29]. Широкое практическое применение квазиоптические резонансные системы нашли также в релятивистской электронике, например [1, 30-32]. Перспективы использования новых модификаций резонансных квазиоптических структур в технике и электронике МСМ-волн достаточно подробно изложены в обзоре [25].

В настоящее время для усиления электромагнитных колебаний МСМ-волн активно обсуждаются вопросы использования нерегулярных открытых волноводов различных модификаций, возбуждение которых осуществляется излучением Смита-Парселла. Впервые такая идея для нерелятивистских приборов рассматривалась в [33]. В дальнейшем был проведен анализ физических процессов взаимодействия ЭП с дифрагированным на периодической структуре полем [34], развита линейная теория усилителя, использующего эффект Смита-Парселла [35, 36], проведено экспериментальное моделирование волновых процессов в такой системе [37], рассмотрена возможность вывода энергии через диэлектрический слой, расположенный между зеркалами ОВ [38, 39]. Общим для таких систем является наличие ОВ, содержащего распределенный источник излучения типа “дифракционная решетка (ДР)-электронный поток” или “ДР-диэлектрический волновод”. При этом основополагающим фактором в вопросе эффективного усиления электромагнитных колебаний является оптимизация параметров электродинамической системы ОВ с точки зрения максимального преобразования энергии ЭП в энергию СВЧ колебаний и выводе ее в нагрузку с минимальными потерями. В этом плане перспективными, как и при использовании в резонансных системах типа ОР, являются металлодиэлектрические структуры (МДС) [25, 40, 41], которые позволяют реализовать режимы преобразования поверхностных волн в объемные на эффектах черенковского, дифракционного и комбинации дифракционно-черенковского излучений. Реализация данных режимов в ОВ и ОР открывает широкие возможности в плане расширения функциональных возможностей приборов на эффекте Смита-Парселла, что показано в работах [41-44]. Кроме того, такие системы могут также использоваться в качестве многофункциональных устройств техники МСМ-волн при возбуждении их дифракционно-связанными источниками излучения [45].

О перспективности и актуальности данного научного направления, связанного с изучением физики волновых процессов в нерегулярных квазиоптических электродинамических системах с распределенными источниками излучения, свидетельствуют также появившиеся в последние годы теоретические и экспериментальные работы прикладного характера [46-48]. Однако отсутствие системного подхода к исследованию вышеперечисленных объектов затрудняет их практическую реализацию.

Целью данного обзора является анализ особенностей конструктивного выполнения и электродинамических свойств резонансно-волноводных нерегулярных квазиоптических систем МСМ-волн, классификации их и определения на этой основе нерешенных к настоящему времени вопросов

физики волновых процессов и практической реализации в конкретных схемах устройств электроники и техники МСМ-волн.

Исходя из поставленной цели, в данном обзоре проанализированы основные типы «классических» нерегулярных квазиоптических систем, которые нашли применение как в релятивистской, так и нерелятивистской электронике МСМ-волн. Рассмотрены новые модификации таких систем, которые были предложены и реализованы в последние годы, на основании чего составлена общая схема классификации анализируемых объектов, позволяющая определить пути их дальнейшего развития.

2. РАСПРЕДЕЛЕННЫЕ ИСТОЧНИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ВОЛН

В электронике МСМ-волн для возбуждения квазиоптических систем в основном используются радиационные эффекты, которые возникают при движении заряженных частиц. К таким эффектам относятся черенковское и переходное излучения, а также их разновидности: индуцированное излучение, излучение Смита-Парселла (дифракционное излучение) [8, 11, 15-18, 50-52].

Черенковское излучение (ЧИ) возбуждается при равномерном движении электронов (или другой заряженной частицы) в среде со скоростью v_e , большей скорости света в этой среде. Существует зависимость фазовой скорости света v_ϕ в безграничной среде от диэлектрической ε и магнитной μ относительных проницаемостей, которая определяется соотношением $v_\phi = c/\sqrt{\varepsilon\mu}$, где c – скорость света в свободном пространстве. Данное электромагнитное излучение характеризуется специфическим угловым распределением, которое состоит в том, что волновой вектор излучаемых волн образует с вектором скорости v_e угол γ_0 , определяемый соотношением $\cos \gamma_0 = c/v_e \sqrt{\varepsilon\mu}$. Поскольку $\cos \gamma_0$ всегда меньше единицы, то черенковское излучение возможно только при $v_e > v_\phi$. Черенковское излучение будет наблюдаться и в том случае, если электрон будет двигаться не только в сплошной среде, но и вблизи среды на расстоянии порядка длины излучаемой волны [15]. Однако предложенные на начальном этапе развития вакуумной электроники схемы черенковских генераторов [53] не получили дальнейшего развития в связи с отсутствием в то время диэлектриков, имеющих большие значения ε и малые потери на высоких частотах. Появление таких диэлектриков, как поликор, рутил и сплавов на основе $\text{BaLn}_2\text{Ti}_4\text{O}_{12}$, $\text{BaCe}_2\text{Ti}_4\text{O}_{12}$, CaZnO_3 - CaTiO_3 [54] стимулировало исследования ЧИ при возбуждении его в диэлектрической среде релятивистскими [55-57] и нерелятивистскими [11, 58, 59] электронными потоками.

В случае ЧИ предполагается, что среда, в которой возникает излучение, является однородной и ее свойства неизменны во времени. Если же свойства среды изменяются во времени вдоль траектории движения частицы, то излучение возникает при любой скорости движения заряда [60]. Такое излучение получило название переходного. В простейшем случае переходное излучение возникает на границе раздела двух сред при прямолинейном и равномерном движении заряда с любой скоростью и нашло широкое применение при диагностике микроструктуры электронных пучков [61, 62].

При движении частицы вблизи других неоднородностей, таких, как, экраны с отверстиями или тела конечных размеров, также возникает излучение, и оно получило название дифракционного излучения (ДИ) [8, 17]. Физическая природа переходного и дифракционного излучений одна

и та же. Поле пролетающей частицы наводит в неоднородности переменные токи или заряды. Движущийся заряд и неоднородность представляют собой два необходимых компонента для того, чтобы возникло излучение. При периодичном расположении неоднородностей интенсивность и когерентность дифракционного излучения существенно возрастают [8, 11].

В [11] показано, что нулевая гармоника ДИ идентична по своим свойствам черенковскому излучению в среде. Кроме того, дифракционное излучение имеет ряд особенностей, присущих только этому радиационному явлению: излучение в вакууме возможно только на отрицательных гармониках; существует перекачка энергии из одной излучающей гармоники в другую, т.е. имеют место аномалии Вуда; амплитуда гармоники ДИ уменьшается с увеличением ее номера.

Впервые электронно-волновой механизм возбуждения дифракционного излучения релятивистским ЭП, взаимодействующим с дифрагированным на решетке электромагнитным полем, был изучен в [63] и в дальнейшем получил название эффекта Смита-Парселла. Суть данного эффекта заключается в том, что при пропускании сфокусированного электростатическим и магнитным полями релятивистского ЭП вблизи плоской оптической отражательной ДР с определенным периодом положительная обратная связь осуществляется собственными волнами дифракционной решетки, которые обеспечивают фазировку при взаимодействии значительного количества электронов на минимальных расстояниях от решетки. В результате наблюдается когерентное излучение оптического диапазона, распространяющееся под разными углами.

Для нерелятивистских ЭП электронно-волновой механизм возникновения ДИ впервые был изучен в работах [64-66] и обобщен в [11]. Показано, что в реальных устройствах дифракционной электроники ЭП, возбуждающий дифракционное излучение, представляет собой сложную активную систему, описываемую в линейном приближении в виде суперпозиции множества продольных и поперечных электронных волн тока, распространяющихся с различными фазовыми скоростями. Такие изменения структуры ЭП приводят к эффектам расщепления диаграмм направленности излучения, изменению поляризационных характеристик возбуждаемого поля, побочному ДИ. Дополнительные аспекты физики возбуждения излучения рассмотрены в работе [67], где развита теория эффекта Смита-Парселла немодулированного электронного потока с учетом двухрежимного взаимодействия, а также определены в слабосигнальном самосогласованном рассмотрении пространственные распределения амплитуд временных гармоник высокочастотного тока пучка.

Кроме потоков заряженных частиц (релятивистских и нерелятивистских), в качестве распределенных источников формирования объемных волн (модель излучения) в электронике и технике МСМ-волн широкое применение нашли также диэлектрические волноводы (ДВ), которые при их расположении вдоль периодических неоднородностей различного типа позволяют за счет наличия поверхностной волны моделировать условия возбуждения черенковского и дифракционного излучений в нерегулярных квазиоптических системах [37,41]. Комбинация ДР-ДВ позволяет также решать вопросы создания сложных антенных систем [21, 22] и организации вывода энергии в устройствах электроники [38, 39].

3. РЕЗОНАНСНЫЕ КВАЗИОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Широкое распространение в электронике МСМ-волн нашли полусферические ОР с периодическими неоднородностями типа отражательной

дифракционной решетки (рис. 1). Такая электродинамическая система используется в оротронах и ГДИ [8, 11].

Принцип действия ГДИ основывается на эффекте дифракционного излучения, возбуждаемого электронным потоком, который движется вблизи дифракционной решетки, расположенной в ОР [11, 14, 68-73]. При этом, взаимодействуя с дифрагированным на решетке падающим полем, реализуются режимы усиления и генерации электромагнитных колебаний. Следовательно, выходные характеристики ГДИ существенным образом определяются свойствами используемого ОР. Наличие периодической структуры в ОР ГДИ значительно видоизменяет электродинамические характеристики классических резонансных квазиоптических структур. При выполнении плоского зеркала в виде отражательной дифракционной решетки (модель оротрона) [69-73] существенно возрастают полные потери, в результате чего добротность для такой системы уменьшается почти в четыре раза. Снижение добротности происходит в результате дополнительных потерь, которые появляются при утечке энергии на излучение волноводных волн, распространяющихся по канавкам к краям зеркала, где коэффициент отражения не равен единице.

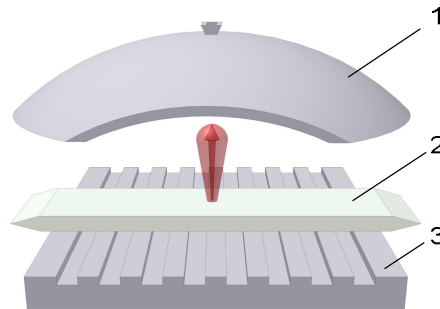


Рис. 1 – Полусферический ОР с дифракционной решеткой: 1 – сферическое зеркало с выводом энергии; 2 – распределенный источник излучения (ДР или ДВ); 3 – плоское зеркало с отражательной дифракционной решеткой

Поэтому для таких систем был предложен полусферический ОР, у которого только центральная часть поверхности плоского зеркала покрыта дифракционной решеткой [8, 11, 68]. Такой резонатор имеет более разреженный спектр колебаний, потери на излучение в котором зависят от геометрических параметров решетки. Изменяя ширину решетки, можно существенно изменять не только количество типов колебаний, возбуждаемых в ОР, но и управлять расстояниями, на которых могут появляться колебания более высокого порядка. Потери в ОР заметно зависят от соотношения периода решетки и длины волны, на которой возбуждается резонатор. Путем изменения глубины канавок отражательной решетки максимальная добротность колебаний может изменяться в несколько раз. В полусферическом ОР с локальной ДР основным является $ТЕМ_{20q}$ тип колебания. Приведенные в [8, 11] результаты исследований показали, что в такой системе возмущение за счет ДР незначительно, если минимум в распределении поля находится над границей между решеткой и зеркалом. Это происходит при ширине ДР, большей или равной ширине главного лепестка поля $ТЕМ_{20q}$ колебания.

При реализации полупроводниковых источников и элементной базы МСМ-волн широкое применение также нашли уголково-эшелеттные ОР.

На основе таких электродинамических систем в [74, 75] предложены модификации квазиоптических твердотельных генераторов накачки со сферо-уголково-эшелетными ОР, которые конструктивно реализованы по схемам с реактивноотражающим и проходным резонаторами. Как показано в [28, 29], колебательная система уголково-эшелетного ОР имеет ряд особенностей: степень разрежения спектра такого ОР несколько меньше, чем спектра ОР с плоским эшелетным зеркалом, однако в спектре имеются типы колебаний с аномально высокой добротностью, классифицируемые как квазиосновные типы колебаний; поле квазиосновных типов колебаний стянуто к оси ОР, и плотность их энергии больше, чем для основных и других типов колебаний; вблизи уголково-эшелетного зеркала структура поля претерпевает трансформацию, и при вершине ОР она близка к структуре поля в прямоугольном волноводе; уголково-эшелетное зеркало является многоступенчатым трансформатором импеданса.

Разнообразие устройств релятивистской электроники, например [1, 9, 56, 76], обусловило необходимость разработки специальных открытых резонансных электродинамических систем, обладающих повышенной электрической прочностью и эффективной селекцией типов колебаний. К таким резонансным системам относится, в частности, кольцевой резонатор, представляющий собой совокупность зеркал, расположенных таким образом, чтобы луч, испытав отражения от резонаторных зеркал, замыкался сам на себя с разделением оптических лучей прямого и отраженных сигналов (рис. 2а).

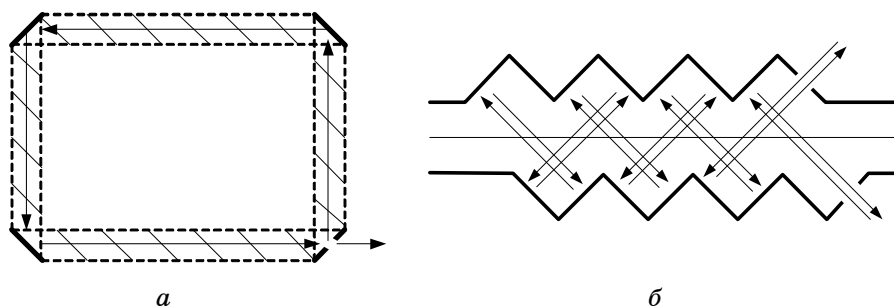


Рис. 2 – Схемы квазиоптических резонансных систем релятивистских устройств электроники: кольцевой резонатор (а), брэгговский резонатор (б)

По сути, в объеме резонатора реализуется режим бегущих волн. Кроме этого, появляется не менее двух дополнительных оптических ветвей, через которые могут включаться другие устройства. Эта особенность была использована в одном из вариантов лазера на свободных электронах с каскадным повышением частоты [77]. В МСМ-диапазоне перспективным является использование также брэгговских резонаторов (рис. 2б). Конструктивно они состоят из резонаторов Фабри-Перо, зеркала которых образуют зубчатые либо волнистые зеркальные поверхности. Такие резонаторы в основном применяются в конструкциях лазеров на свободных электронах [12, 77, 78]. Отличаясь многофункциональностью, брэгговский резонатор является многочастотной системой. Кроме того, для волны накачки, распространяющейся вдоль оси резонатора, система зеркал является высокоселективной замедляющей структурой.

В работах [11, 79-83] предложены и частично исследованы устройства дифракционной электроники на связанных ОР, которые по сравнению с однорезонаторными ГДИ обладают рядом преимуществ: имеют более широкий диапазон электронной перестройки частоты, могут эффективно использоваться в качестве генераторов, усилителей мощности и умножи-

телей частоты. Связь ОР в таких устройствах может быть реализована либо через дифрагированное на краях зеркал поле [11, 80, 82] путем последовательного расположения резонаторов, либо через дифрагированное на ленточных решетках поле [83, 84] путем параллельного включения ОР относительно оси распределенного источника излучения.

В последнее время активно обсуждаются вопросы применения в электронике МСМ-волн ОР с МДС, которые позволяют реализовывать различные режимы трансформации энергии поверхностных волн в объемные путем изменения параметров их электродинамических систем [25, 85-89]. Пример такого устройства приведен на рис. 3.

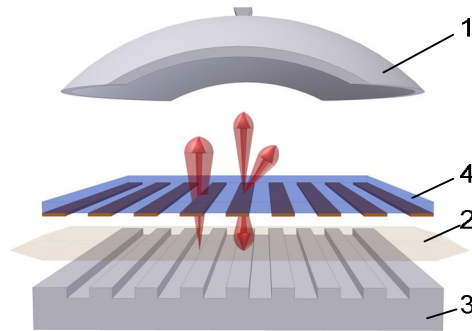


Рис. 3 – Резонансная квазиоптическая система с МДС: 1 – сферическое зеркало; 2 – распределенный источник излучения; 3 – отражательная ДР; 4 – периодическая МДС

Между зеркалами ОР расположена МДС, выполненная в виде диэлектрического слоя, на который нанесена ленточная ДР. Такая электродинамическая система является базовой при создании дифракционно-черенковских генераторов. Однако при ее использовании необходимо учитывать все возможные режимы возбуждения дифракционно-черенковского излучения (ДЧИ) распределенным источником излучения, расположенным вблизи границы диэлектрического слоя с ленточной ДР. Частично экспериментальные результаты физики волнового моделирования ДЧИ для пространственно ограниченных МДС проанализированы в [90]. В работах [41, 91, 92] показано, что введение в открытый резонатор МДС может приводить к качественно новым электродинамическим свойствам такой системы: при изменении параметров МДС возможна реализация режимов затухания энергии в ОР, увеличения амплитуды колебаний и их добротности, селекции колебаний. Дальнейшие исследования таких систем [49, 93-96] позволили предложить и обосновать конкретные схемы приборов дифракционной электроники с пространственно-развитыми резонансными структурами: дифракционно-черенковского генератора, черенковской ЛОВ.

4. ВОЛНОВОДНЫЕ КВАЗИОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Волноводные квазиоптические системы наиболее широкое применение нашли в релятивистской электронике, где они используются в качестве канализирующих либо локализирующих энергию электромагнитных волн элементов. В основном это нерегулярные или слабо нерегулярные волноводы. К их разновидностям можно отнести сверхразмерные волноводы различных форм и сечений, волноводы с периодическими неоднородностями, такими, как, проводящие спиралевидные, типа “гребенка”, штыревые,

брэгговские и диафрагмированные, различные разновидности диэлектрических волноводов.

Применение сверхразмерных волноводов определяется требованиями электрической прочности систем при наличии больших мощностей и использованием радиационных эффектов для генерации электромагнитных колебаний. Так, например, в черенковском генераторе [97] использована волноведущая система с отношением диаметра к длине волны равным 13. Обычно это соотношение в различных релятивистских генераторах составляет $5 \div 8$ [9].

Вместе с функцией ввода и вывода СВЧ-энергии из объема взаимодействия ЭП и электромагнитной волны в некоторых конструкциях релятивистских приборов открытые нерегулярные волноводы используются в качестве устройств, обеспечивающих эффективный энергообмен между электронным потоком и электромагнитной волной. Например, основными элементами релятивистских приборов, таких, как лазер на свободных электронах (ЛСЭ), релятивистские ГДИ, ЛБВ, оротроны, черенковские генераторы, являются волноводные линии замедленных волн или замедляющие структуры. Другими словами, замедляющие структуры могут выполнять функцию модуляции ЭП, обеспечивать выполнение условия фазовой фокусировки и при выполнении условия перенаселенности электронов в тормозящей фазе электромагнитного поля способствовать отбору энергии у ЭП. При этом периодические структуры являются селективными устройствами, определяющими свойства распространяющихся по ним волн, что в значительной мере определяет механизмы взаимодействия ЭП с электромагнитными волнами, а также способы ввода и вывода излучения из устройств.

Периодические замедляющие системы к тому же являются преобразователями электромагнитных сигналов в устройствах активных смесителей электромагнитных волн миллиметрового и субмиллиметрового диапазона, а также трансформаторами поверхностных волн в объемные волны и наоборот. Периодические металлические структуры нашли применение в ЛСЭ – доплетронах с накачкой СВЧ замедленной электромагнитной волной [77], в релятивистской ЛБВ [9, 98], в черенковских генераторах [13, 97], в релятивистских ГДИ и оротронах [9]. В системе накачки ЛСЭ (Е-убитрон) применяется виглерная бифилярная сверхпроводящая спираль [77], аналог которой используется в классических ЛБВ. В [12] использование брэгговской решетки планарной геометрии в дополнение дает широкие возможности для ввода-вывода излучения из ЛСЭ-усилителя.

Кроме металлических нерегулярных волноводов, используются и диэлектрические замедляющие системы, которые также могут совмещать в себе функции ввода-вывода энергии, а также участвовать в преобразовании кинетической энергии ЭП в энергию электромагнитного поля. Например, в [13, 55] исследован черенковский СВЧ-усилитель с замедляющей системой в виде круглого волновода с диэлектрическим стержнем. Удобство такой системы состоит в возможности вывода излучения в свободное пространство без дополнительных трактов и преобразователей типов волн. Заметим, что существуют два различных по конструкции вида черенковских генераторов и усилителей. В первом в качестве источника излучения является диэлектрическая среда, над которой движется релятивистский ЭП (черенковское излучение). Во втором – ЭП и периодическая структура (дифракционное излучение).

Основные типы открытых волноведущих систем, применяемых в релятивистской электронике, представлены на рис. 4.

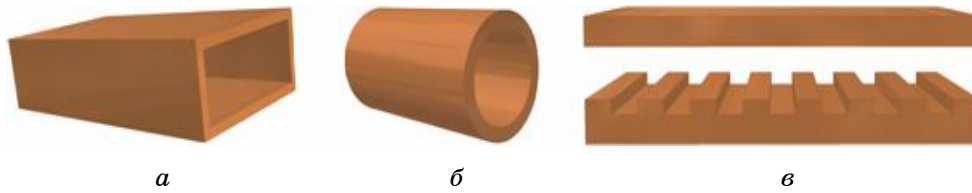


Рис. 4 – Основные типы волноведущих систем, применяемых в релятивистской электронике: прямоугольный волновод (а); круглый волновод (б); замедляющая система (в)

Для решения проблемы широкополосного усиления электромагнитных волн МСМ-диапазона волноведущие нерегулярные системы находят также применение в нерелятивистской вакуумной электронике. На данный момент простейший усилитель миллиметрового диапазона реализован на базе ГДИ, работающего в предгенерационном режиме возбуждения колебаний, т.е. при токах пучка, меньших пускового [99]. Ширина полосы частот усиливаемого сигнала в таком приборе определяется добротностью ОР и в лучшем случае равняется полосе пропускания резонатора. Впервые волноводный вариант усилителя на эффекте Смита-Парселла был предложен в [33]: нерелятивистский ЭП 1 взаимодействует с бегущей объемной волной дифракционного излучения в открытой волноведущей системе, образованной поверхностями пассивного 2 и активного 3 (с дифракционной решеткой) зеркал (рис. 5а).

В дальнейшем рассматривались вопросы возможности усиления электромагнитных волн в системе, представленной на рис. 5б, где открытый волновод образован поверхностями пассивного 2 и активного 3 зеркал, выполненных в виде отражательных дифракционных решеток. Вдоль поверхности активного зеркала 3 движется ленточный ЭП 1. Вблизи поверхности пассивного зеркала 2 расположен диэлектрический волновод 4 с устройствами ввода и вывода энергии. При квазисинхронизме скорости ЭП с одной из поверхностных волн происходит группировка электронов в сгустки, излучающие на частоте входного сигнала. На решетке пассивного зеркала происходит обратное преобразование объемной волны в поверхностную волну диэлектрического волновода с последующим ее переизлучением в открытый волновод. При условии синфазного излучения с активного и пассивного зеркал наблюдается эффект усиления медленной волной пространственного заряда ЭП прямой волны ОВ.

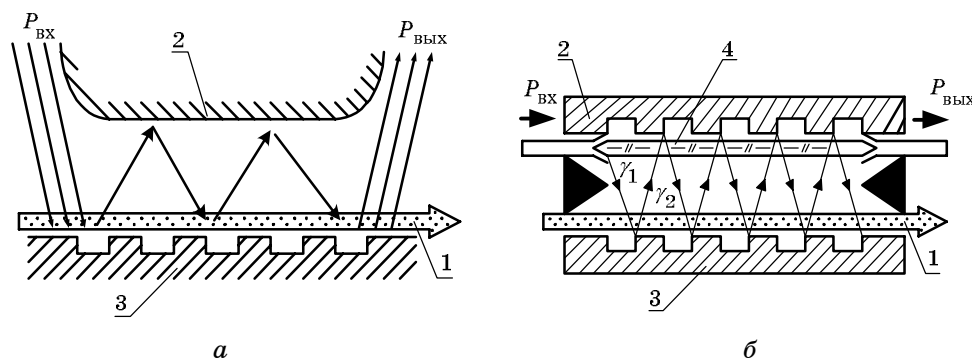


Рис. 5 – Схемы нерелятивистских усилителей на базе открытых нерегулярных волноведущих систем: схема усилителя [33] (а); схема усилителя [34, 100] (б)

Перспективной с точки зрения реализации квазиоптического вывода энергии электромагнитных волн является система ОВ с диэлектрическим слоем, расположенным в области пассивного зеркала 2 (рис. 5а). Для такой системы развита линейная самосогласованная теория усиления электромагнитных волн на эффекте Смита-Парселла, учитывающая влияние диэлектрического слоя и толщины электронного потока на условия возбуждения колебаний в открытом волноводе [38, 39, 101-106]. Установлено, что путем изменения электродинамических параметров ОВ возможна реализация различных режимов возбуждения системы: режима излучения ДИ по нормали – регенеративный режим, режима бегущей объемной волны и режима поверхностных волн (ЛОВ, ЛБВ).

Практический интерес в случае интегрального исполнения усилителя представляет также планарная периодическая МДС, которая в простейшем случае образована металлическим экраном и диэлектрическим слоем, на боковую поверхность которого нанесена ленточная дифракционная решетка [41, 107]. Вдоль решетки расположен распределенный источник излучения, который в зависимости от параметров системы может возбуждать различные пространственные гармоники с номерами $n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ и плотностью энергии S_n [11, 41]. Для такой системы разработаны численные и экспериментальные методы моделирования различных режимов возбуждения ДЧИ [40, 108-111], позволяющие определить количественные соотношения плотности энергии пространственных гармоник излучения и оптимизировать параметры электродинамической системы в соответствии с поставленной задачей.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенного обзора на рис. 6 представлена классификация нерегулярных квазиоптических систем различных модификаций, применяемых в электронике и технике МСМ-волн, которая позволяет проиллюстрировать их многообразие и выделить класс структур, для которых до настоящего времени не решены задачи по оптимизации электродинамических характеристик.

Основу релятивистских и нерелятивистских приборов МСМ-волн составляют резонансные и волноведущие квазиоптические системы различных модификаций. К настоящему времени наиболее изученными теоретически и экспериментально являются резонансные и волноведущие системы релятивистских приборов, обеспечивающих электромагнитные колебания с высокими энергиями [1, 9]. Отличительной особенностью электродинамических систем такого типа является электрическая и механическая прочности к тепловым воздействиям со стороны электромагнитного поля; обеспечение максимума взаимодействия между полями и релятивистским потоком; повышенная функциональность колебательной системы, обеспечивающей одновременную эффективность взаимодействия ЭП с полем и ввода или вывода СВЧ-колебаний.

Потребность реализации вышеописанных принципов в нерелятивистских приборах привела к созданию нового класса квазиоптических нерегулярных резонансных систем, основой которых являются полусферические ОР с ДР различных модификаций: отражательных ДР, ленточных ДР, уголково-эшелеттных ДР и ОР с периодическими МДС. Отличительной особенностью таких приборов является использование ЭП средних энергий, которые не требуют специальных мер по обеспечению повышенной электрической и механической прочности к тепловым

воздействиям. Свойства данных электродинамических систем достаточно полно изучены и используются в нерелятивистской электронике и технике МСМ-волн [11, 21, 25].

К настоящему времени менее исследованными являются нерегулярные волноведущие квазиоптические системы нерелятивистских приборов, на основе которых предложены различные модификации усилителя на эффекте Смита-Парселла [38, 39].

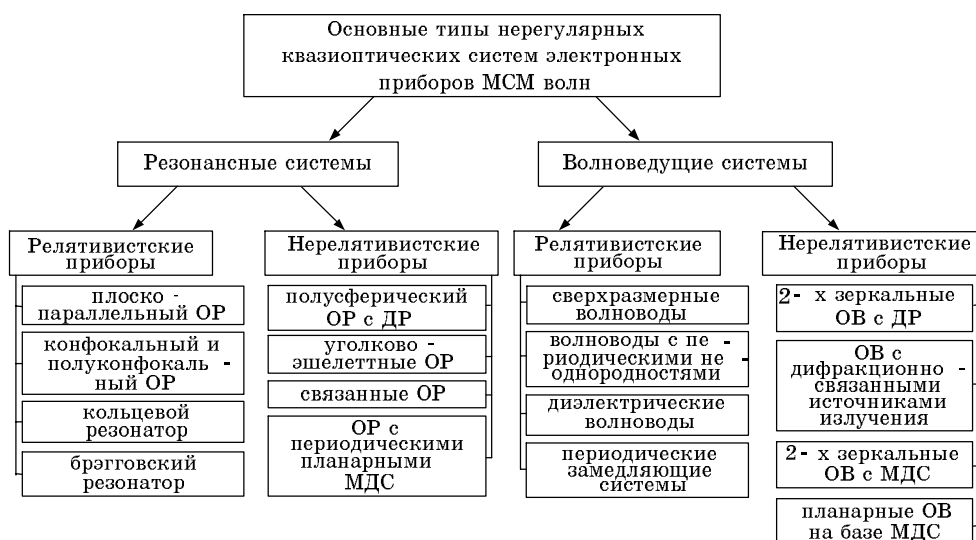


Рис. 6 - Классификация нерегулярных квазиоптических систем, применяемых в электронике и технике миллиметровых и субмиллиметровых длин волн

Простейшей системой, которая достаточно полно исследована (как теоретически, так и экспериментально), является двухзеркальный ОБ с ДР, вдоль которой движется ЭП (рис. 5а). Для такой модификации усилителя с плоскопараллельными зеркалами построена одномерная, не учитывающая влияния на электронно-волновые процессы магнитного фокусирующего поля, линейная самосогласованная теория и проведено экспериментальное моделирование волновых свойств электродинамической системы. Эпизодически рассмотрены вопросы влияния фазовой коррекции зеркал на процессы формирования бегущей волны вдоль оси ОБ. На уровне экспериментального моделирования [45] исследованы ОБ с дифракционно-связанными источниками возбуждения волн, которые являются основой при создании усилителя по схеме рис. 5б, и элементной базы МСМ-волн [48]. Не определены общие закономерности физики волновых процессов в ОБ с периодическими МДС, которые также могут быть использованы как самостоятельные элементы при построении планарных систем устройств МСМ-волн [112].

IRREGULAR QUASI-OPTICAL SYSTEMS OF MILLIMETER WAVES ELECTRONICS

G.S. Vorobjov, V.O. Zhurba, M.V. Petrovsky, A.A. Rybalko, Yu.V. Shulga

Sumy State University,
2, Rimsky-Korsakov Str., 40007, Sumy, Ukraine
E-mail: vp@sumdu.edu.ua

The basic types and research results of irregular quasi-optical systems, applied in electronics and millimeter-wave technology, are presented in the review. The general property of such systems is the presence of inhomogeneities, on which the transformation of surface waves of electron beams (or dielectric waveguides) into bulk waves, exciting the specified type of quasi-optical device (open resonator or waveguide, periodic or dielectric structure and others), occurs. We compared the levels of development for relativistic and non-relativistic electro-vacuum devices. The applicability of construction of low-voltage amplifiers and oscillators of millimeter range, including the planar technology uses for their microminiaturization, is shown. Based on the review we have built the scheme of irregular quasi-optical systems classification and evaluated the most advanced directions for further researches.

Keywords: IRREGULAR QUASI-OPTICAL SYSTEMS, MILLIMETER-WAVE TECHNOLOGY, SURFACE WAVES, OPEN RESONATOR, WAVEGUIDE

НЕРЕГУЛЯРНІ КВАЗІОПТИЧНІ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОНІКИ МІЛІМЕТРОВИХ ХВИЛЬ

Г.С. Воробйов, В.О. Журба, М.В. Петровський, О.О. Рибалко, Ю.В. Шульга

Сумський державний університет,
вул. Римського-Корсакова, 2, 40007, Суми, Україна
E-mail: vp@sumdu.edu.ua

В огляді наведені основні типи та результати досліджень нерегулярних квазіоптичних систем, які застосовуються в електроніці та техніці міліметрових хвиль. Проведено порівняння рівня розвитку релятивістських та нерелятивістських електровакуумних пристроїв. Показана актуальність побудови низьковольтних підсилювачів та генераторів міліметрового діапазону, включаючи використання планарних технологій для їх мікромініатюризації. На основі огляду побудована схема класифікації нерегулярних квазіоптичних систем та визначені найбільш перспективні напрямки подальших досліджень.

Ключові слова: НЕРЕГУЛЯРНІ КВАЗІОПТИЧНІ СИСТЕМИ, ТЕХНІКА МІЛІМЕТРОВИХ ХВИЛЬ, ПОВЕРХНЕВІ ХВИЛІ, ВІДКРИТИЙ РЕЗОНАТОР, ХВИЛЕВОД.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Вакуумная СВЧ-электроника: Сборник обзоров* (Нижний Новгород: Институт прикладной физики РАН: 2002).
2. Р.П. Быстров, А.П. Выставкин, М.Б. Голант и др., *Зарубежная радиоэлектроника* №11, 3 (1997).
3. G.S. Vorobjov, A.S. Krivets, A.A. Rybalko, V.O. Zhurba, *18th International Crimean Conference – Microwave and Telecommunication Technology (CRIMICO-2008) art. No 4676336, 169* (2008).
4. М.Б. Голант, Ю.Л. Бобровский, *Генераторы СВЧ малой мощности. Вопросы оптимизации параметров* (М.: Сов. радио: 1977).
5. Л.Ф. Тесленко, А.В. Иванова и др., *Лампы бегущей волны. Коллекторы, выводы энергии, поглощающие устройства, вопросы технологии, схемные вопросы, работы зарубежных фирм в области создания ЛБВ. Обзоры по электронной технике. Сер. 1, Электроника СВЧ* (М.: ЦНИИ «Электроника», 1990).
6. А.Я. Усиков, Э.А. Канер, И.Д. Трутень и др., *Электроника и радиофизика миллиметровых и субмиллиметровых радиоволн* (К.: Наук. думка: 1986).

7. В.Д. Селемир, А.Е. Дубинов, Е.Е. Дубинов и др., *Письма в ЖТФ* **27** №14, 25 (2001) (V.D. Selemir, A.E. Dubinov, E.E. Dubinov, et al., *Tech. Phys. Lett.* **27** No7, 583 (2001)).
8. В.П. Шестопапов *Дифракционная электроника*.– Харьков: ХГУ: 1976).
9. *Итоги науки и техники. Сер. Электроника* (М.: ВИНТИ: 1985).
10. В. Newman, R. Warren, R. Sheffield, et al., *IEEE J. Quantum Electr.* **21** No7, 867 (1985).
11. *Генераторы дифракционного излучения* (Ред. В.П. Шестопапова) (К.: Наук. думка: 1991).
12. Н.С. Гинзбург, Р.М. Розенталь, Н.Ю. Песков и др., *ЖТФ* **71** №12, 58 (2001) (N.S. Ginzburg, R.M. Rozental', N.Yu. Peskov, et. al, *Tech. Phys.* **46** No12, 1545 (2001)).
13. А.С. Шлапаковский, И. Шамилоглу, И.И. Грушин и др., *ЖТФ* **72** № 11, 90 (2002) (A.S. Shlapakovskii, E. Schamiloglu, I.I. Grushin, et al., *Tech. Phys.* **47** No11, 1434 (2002)).
14. А.А. Шматько, *Электронно-волновые системы миллиметрового диапазона. Т. I* (Харьков: ХНУ им. В.Н. Каразина: 2008).
15. В.Л. Гинзбург, В.Н. Цытович, *Переходное излучение и переходное рассеяние* (М.: Наука: 1984).
16. В.Л. Гинзбург, *УФН* **166** №10, 1033 (1996) (V.L. Ginzburg, *Phys-Usp.* **166** No10, 1033 (1996)).
17. Б.М. Болотовский, Е.А. Галастьян, *УФН* **170** №8, 809 (2000) (B.M. Bolotovskiy, E.A. Galast'yan, *Phys-Usp.* **170** No8, 809 (2000)).
18. К.Ю. Платонов, Г.Д. Флейшман, *УФН* **172** №3, 241 (2002) (K.Yu. Platonov, G.D. Fleishman, *Phys-Usp.* **172** No3, 241 (2002)).
19. Л.А. Вайнштейн, *Открытые резонаторы и открытые волноводы* (М.: Сов. радио: 1966).
20. *Техника субмиллиметровых волн* (ред. Р.А. Валитова) (М.: Сов. радио, 1969).
21. В.П. Шестопапов *Физические основы миллиметровой и субмиллиметровой техники. Т.1.: Открытые структуры* (К.: Наукова думка: 1985).
22. Л.А. Вайнштейн, *Теория дифракции. Электроника СВЧ* (М.: Радио и связь, 1995).
23. Ю.И. Кошуринов, В.Г. Павельев, М.И. Петелин и др., *Письма в ЖТФ* **31**, № 16, 73 (2005) (Yu.I. Koshurinov, V.G. Pavel'ev, M.I. Petelin, et al, D.Yu. Shche-gol'kov, I.V. Turchin, *Tech. Phys. Lett.* **31** No8, 709 (2005)).
24. А.В. Архипов, О.И. Белоус, И.К. Кузьмичев, А.С. Тищенко, *Радиофизика и радиоастрономия* **10** № 2, 166 (2005).
25. G.S. Vorobyov, M.V. Petrovsky, A.I. Ruban, V.O. Zhurba et al., *Telecomm. Radio Eng. No66(20), 1839* (2007).
26. С.Н. Власов, Е.В. Копосова, С.Е. Мясникова, В.В. Паршин, *ЖТФ* **72**, № 12, 79 (2002) (S.N. Vlasov, E.V. Korosova, S.E. Myasnikova, V.V. Parshin, *Tech. Phys.* **47** No12, 1561 (2002)).
27. В.С. Мирошниченко, П.Н. Мележик, Е.Б. Сенкевич, *ЖТФ* **76** №8, 115 (2006). (V.S. Miroshnichenko, P.N. Melezhik, Ye.B. Senkevich, *Tech. Phys.* **51** No8, 1076 (2006)).
28. O.I. Bilous, A.I. Fisun, O.N. Sukhoruchko, *Telecomm. Radio Eng.* **59** No1-2, 111 (2003).
29. О.Н. Сухоручко, В.И. Ткаченко, А.И. Фисун, *Прикладная радиоэлектроника* №2, 163 (2003).
30. А.Ф. Александров, А.М. Афонин, С.Ю. Галузо и др., *Релятивистская высоко-частотная электроника* №2, 145 (1981).
31. S.H. Gold, G.S. Nusinovich, *Rev. Scient. Instr.* **68** No11, 3945 (1997).
32. В.А. Черепенин, *Радиотехника* №1, 114 (2005).

33. Л.А. Вайнштейн, В.А. Солнцев, *Лекции по сверхвысокочастотной электронике* (М.: Сов. радио: 1973).
34. А.А. Вертий, Г.С. Воробьев, И.В. Иванченко и др., *Изв. вузов. Радиофизика* **31** №6, 1242 (1988).
35. Г.С. Воробьев, А.И. Рубан, А.А. Шматько, *Изв. вузов. Радиоэлектроника* **42** №6, 67 (1999).
36. Г.С. Воробьев, А.И. Рубан, А.С. Кривец, А.А. Шматько, *Вісник СумДУ* №1(12) 28 (1999).
37. Г.С. Воробьев, А.И. Рубан, А.С. Кривец, А.А. Шматько, *Вісник СумДУ* №1(12) 34 (1999).
38. Г.С. Воробьев, А.С. Кривец, А.А. Шматько, *Изв. вузов. Радиоэлектроника* №6, 44 (2005).
39. G.S. Vorobyov, A.S. Krivets, A.A. Shmatko, et al., *Telecomm. Radio Eng.* No**59(10-12)**, 80 (2003).
40. Г. Воробйов, К. Пушкаръов, А. Рубан, О. Цвик, *Фізичний збірник НТШ* **4** 317 (2001).
41. Г.С. Воробьев, А.С. Кривец, М.В. Петровский и др. *Вісник СумДУ. Серія: Фізика* №10(56), 110 (2003).
42. Г.С. Воробьев, А.С. Кривец, М.В. Петровский, А.И. Рубан *Вісник СумДУ: Серія: Фізика, математика* № 5(38)-6(39), 117 (2002).
43. А.С. Кривец, *Радиотехника* №135 15, (2003).
44. Г.С. Воробьев, А.С. Кривец, А.А. Шматько, Э.М. Хуторян, *Вісник СумДУ: Серія: Фізика, математика* №5(38)-6(39) 110 (2002).
45. Г.С. Воробьев, А.С. Кривец, В.О. Журба, А.А. Рыбалко, *Изв. вузов. Радиоэлектроника* **51** №11,3 (2008) (G.S. Vorobyov, A.S. Krivets, V.O. Zhurba, A.A. Rybalko, *Radioelectron. Commun. Syst.* **51** No**11**, 573 (2008)).
46. Г.С. Воробьев, А.С. Кривец, В.О. Журба, А.А. Рыбалко, *Вісник СумДУ. Серія: Фізика, математика, механіка* № 1, 82 (2008).
47. Г.С. Воробьев, В.О. Журба, А.С. Кривец, Ю.А. Крутько, А.А. Рыбалко, *Радиотехника* №153 65 (2008).
48. Г.С. Воробьев, М.В. Петровский, В.О. Журба, А.А. Рыбалко, Ю.В. Шульга, *Вісник СумДУ. Серія: Фізика, математика, механіка* №2, 191 (2008).
49. Г.С. Воробьев, М.В. Петровский, В.О. Журба, *Вісник СумДУ. Серія: Фізика, математика, механіка* № 6(90), 5 (2006).
50. И.И. Каликинский, *ЖТФ* **68** №2, 122 (1998) (I.I. Kalikinskii, *Tech. Phys.* **43** No**2**, 247 (1998)).
51. G. Duncas, M.F. Kimmitt, Th. Kormann et al., *Int. J. Infrared Milli.* **24(6)**, 829 (2003).
52. С.Г. Оганесян, *Письма в ЖТФ* **29** №1, 13 (2003) (S.G. Oganesyanyan, *Tech. Phys. Lett.* **29** No**1**, 5 (2003)).
53. *Миллиметровые и субмиллиметровые волны* (ред. Р.Г. Мириманова) (М.: Изд-во иностр. лит.: 1959).
54. Е.А. Нанашева, О.Н. Трубицина, Н.Ф. Картенко, О.А. Усов, *ФТТ* **41** №5, 882 (1999). (E.A. Nenasheva, O.N. Trubitsyna, N.F. Kartenko, O.A. Usov, *Phys. Solid State* **41** No**5**, 799 (1999)).
55. А.С. Шлапаковский, *Письма в ЖТФ* **25** №7, 43 (1999) (A.S. Shlapakovskii, *Tech. Phys. Lett.* **25** No**4**, 267 (1999)).
56. В.А. Балакирев, Н.И. Карбушев, А.О. Островский, Ю.В. Ткач, *Теория черенковских усилителей и генераторов на релятивистских пучках взаимодействий* (К.: Наукова думка: 1993).
57. В.И. Кошелев, В.А. Попов, *Радиотехника и электроника* **45** № 9, 1109 (2000).
58. А.И. Цвык, А.В. Нестеренко, К.А. Пушкарев, *Радиофизика и электроника* №1, 100 (1996).

59. Г.С. Воробьев, *Волновые процессы в приборах дифракционной электроники с пространственно-развитыми структурами: автореф. дис. д-ра. физ.-мат.наук: 01.04.01, 01.04.04* (Сумы: Изд-во СумГУ: 2000).
60. В.Л. Гинзбург, И.М. Франк, *ЖЭТФ* **16** №1, 15 (1946).
61. Г.С. Воробьев, А.А. Дрозденко, А.Г. Пономарев, К.А. Пушкарев, *Компрессорное и энергетическое машиностроение*, №2(2), 93 (2005).
62. Г.С. Воробьев, А.А. Дрозденко, Д.А. Нагорный, А.А. Рыбалко, *Изв. вузов. Радиоэлектроника* №7(51), 22 (2008) (G.S. Vorobjov, A.A. Drozdenko, D.A. Nagorny, A.A. Rybalko, *Radioelectron. Commun. Syst.* **51** No7, 364 (2008)).
63. S.I. Smith, E.M. Purcell, *Phys. Rev.* No 24, 1069 (1953).
64. А.И. Цвык, *Докл. АН УССР. Сер. А* №12, 53 (1985).
65. П.П. Максимов, А.И. Цвык, В.П. Шестопапов, *Докл. АН СССР* **280** №6, 1353 (1985).
66. Г.С. Воробьев, А.В. Нестеренко, А.И. Цвык и др., *Изв. вузов. Радиофизика* **31** №2, 805 (1988).
67. А.А. Шматько, П.В. Юдинцев, *Вісник СумДУ: Серія: Фізика, математика, механіка* №1, 66 (2008).
68. И.М. Балаклицкий, Б.К. Скрынник, О.А. Третьяков и др., *УФЖ* **14** №4, 539 (1969).
69. И.М. Балаклицкий, Г.С. Воробьев, А.И. Цвык, *Оротрон: А.с. 593589 СССР, МКИ Н01J 25/00 (Открытия. Изобрет. №33, 327 (1981))*.
70. E.M. Marshall, P.M. Philips, J.E. Walsh, *IEEE T. Plasma Sci.* **16** No2, 199 (1998).
71. Н.С. Гинзбург, Н.А. Завольский, В.Е. Запезалов и др., *ЖТФ* **70** №4, 99 (2000) (N.S. Ginzburg, N.A. Zavol'skii, V.E. Zapevalov, et al., *Tech. Phys.* **45** No4, 480 (2000)).
72. V.L. Bratman, B.S. Dumesl, A.E. Fedotov et al., *Int. J. Infrared Milli.* **23** No11, 1595 (2002).
73. Ф.С. Русин, В.Л. Братман, А.Э. Федотов, *Вакуумная СВЧ-электроника: Сборник обзоров* 121 (2002).
74. О.И. Белоус, Б.М. Булгаков, А.И. Фисун, А.М. Фурсов, *Труды Всесоюзного совещания «Малошумящие генераторы СВЧ. Состояние разработок и перспективы применения в метрологии»*, 38 (Иркутск: 1991).
75. О.Н. Сухоручко, О.И. Белоус, А.П. Касьяненко, А.И. Фисун, *13-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо' 2004)*, 141 (Севастополь: «Вебер»: 2003).
76. Н.С. Гинзбург, А.С. Сергеев, Н.Ю. Песков, *Письма в ЖТФ* **25**, №19, 87 (1999) (N.S. Ginzburg, A.S. Sergeev, N.Yu. Peskov, et. al, *Tech. Phys. Lett.* **25** No10, 796 (1999)).
77. В.В. Кулиш, *Деп. в УкрНИИНТИ 5.09.90, №1526 – Ук90. – Реф. в: Гос. респ. научн.-техн. библ. УССР.* (Сумы: ХПИ Сумский филиал: 1990).
78. Н.Ю. Песков, Н.С. Гинзбург, А.А. Каминский и др., *Письма в ЖТФ* **25** №11, 19 (1999) (N.Yu. Peskov, N.S. Ginzburg, A.A. Kaminskii, et al., *Tech. Phys. Lett.* **25** No6, 429 (1999)).
79. И.М. Балаклицкий, Г.С. Воробьев, А.И. Цвык и др., *Генератор дифракционного излучения. А.с. 749278 СССР, МКИ Н01J 25/00 (Открытия. Изобрет. №35, 306 (1982))*.
80. Г.С. Воробьев, А.В. Нестеренко, А.И. Цвык, *IV Всесоюзный симпозиум по мм- и субммволнам. Т.1*, 54 (Харьков: 1984).
81. Г.С. Воробьев, Р.И. Куц, К.А. Пушкарев, А.И. Рубан, *Тезисы докладов научно-технической конференции «Техника и физика электронных систем и устройств» Ч.2*, 226 (Сумы: СумГУ: 1995).

82. G.S. Vorobjov, A.I. Ruban, A.I. Tsvyk, *The Third International symposium physics and engineering of millimeter and submillimeter waves*, 194 (Kharkov: IRE NAS of Ukraine: 1996).
83. А.І. Рубан, *Електромагнітні взаємодії просторових гармонік черенковського та дифракційного випромінювань в електродинамічних системах пристроїв край високих частот: Автореф. дис. к.ф.-м.н: 01.04.01* (Суми: Вид-во СумДУ: 1999).
84. G.S. Vorobjov, *Laser Phys.* **10** No4, 932 (2000).
85. Г.С. Воробьев, О.С. Макеев, К.А. Пушкарев, А.И. Цвык, *Вісник СумДУ* №2(6), 28 (1996).
86. Г.С. Воробьев, А.В. Нестеренко, К.А. Пушкарев, А.И. Цвык, *Современные проблемы прикладной физики*, 101 (К.: НМК ВО: 1992).
87. Г.С. Воробьев, О.С. Макеев, К.А. Пушкарев, А.И. Цвык, *Вісник СумДУ* №1(5), 17 (1996).
88. К.О. Пушкарьов *Дослідження дифракційно-черенковського випромінювання електронного потоку у відкритих металодіелектричних структурах: автореф. дис. к.ф.-м.н: 01.04.01, 01.04.04* (Суми: Вид-во СумДУ: 1997).
89. G.S. Vorobjov, K.A. Pushkarev, A.I. Ruban, A.I. Tsvyk, *The Third International symposium physics and engineering of millimeter and submillimeter waves*, 196 (Kharkov: IRE NAS of Ukraine: 1998).
90. Г.С. Воробьев, *Радиотехника* №116, 12 (2000).
91. Г.С. Воробьев, М.В. Петровский, А.С. Кривец, А.И. Цвык, *14-я Международная Крымская конференция «СВЧ – техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2004)*, 211 (Севастополь: «Вебер»: 2004).
92. Г.С. Воробьев, М.В. Петровский, А.С. Кривец, *Изв. вузов. Радиоэлектроника* **49** №7, 56 (2006).
93. Г.С. Воробьев, М.В. Петровский, А.И. Рубан, *13-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо' 2004)*, 286 (Севастополь: «Вебер»: 2003).
94. М. Петровський, О. Победін, *Всеукраїнська конференція молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики «ЕВРИКА 2003»*, 109 (Львів: ЛНУ ім. Івана Франка: 2003).
95. М. Петровський, *Міжнародна конференція молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики «ЕВРИКА-2004»*, 213 (Львів: ЛНУ ім. Івана Франка, 2004).
96. G.S. Vorobjov, M.V. Petrovsky, A.I. Tsvyk, *The Fifth International Kharkov symposium on physics and engineering of microwaves, millimeter, and submillimeter waves*, 576 (Kharkov: IRE NAS of Ukraine: 2004).
97. С.П. Бугаев, В.И. Канавец, В.И. Кошелев и др., *Радиотехника и электроника. Сер.: Электроника СВЧ* №2, 400 (1989).
98. Э.Б. Абубакиров, А.В. Савельев, *ЖТФ* **70** №7, 70 (2000) (Е.В. Abubakirov, A.V. Savel'ev, *Tech. Phys.* **45** No7, 883 (2000)).
99. В.П. Андросов, А.А. Вертий, И.К. Кузьмичев, *Электроника миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов*, 13 (К.: Наук. думка: 1988).
100. Г.С. Воробьев, А.И. Цвык, О.С. Макеев, *Труды научно-технической конференции «Техника и физика электронных систем и устройств»*, 223 (Сумы: Изд-во СумГУ: 1995).
101. А.С. Кривец, *Волновые процессы в приборах с открытыми волноводно-диэлектрическими структурами с распределенными источниками излучения: Автореф. дис. к.ф.-м.н: 01.04.01* (Суми: Вид-во СумДУ: 2004).
102. Г.С. Воробьев, А.С. Кривец *4-й Международный молодежный форум «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке»*, 45 (Харьков: ХТУРЭ: 2000).

103. О.С. Кривець, *11-та Міжнародна конференція студентів і молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики «Еврика – 2001»*, 63 (Львів:– 2001.)
104. А.С. Кривець, *Вісник СумДУ. Серія: Фізика, математика, механіка №3(24)-4(25)*, 112 (2001).
105. Г.С. Воробьев, А.А. Шматько, А.С. Кривец, М.В. Петровский, *14-я Международная Крымская конференция «СВЧ – техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2004)*, 209 (Севастополь: «Вебер»: 2004).
106. О.С. Кривець, М.В. Петровський, *Вісник Львівського університету. Серія фізична №37*, 123 (2004).
107. Г.С. Воробьев, М.В. Петровский, А.И. Цвык, Э.М. Хуторян, Л.И. Цвык, *Вісник СумДУ. Серія: Фізика, математика, механіка №4(76)*, 159 (2005).
108. G.S. Vorobyov, A.I. Tzvuk, K.A. Pushkaryov, O.S. Makeyev, *Int. J. Infrared Milli.* **17 No10**, 1761 (1996).
109. Л.И. Николаенко, А.И.Цвык, *Сб. Радиотехника №19*, 102 (1971).
110. Г.С. Воробьев, К.А.Пушкарев, А.И.Цвык, *Радиотехника и электроника* **42**, 738 (1997).
111. Г.С. Воробьев, К.А. Пушкарев, А.И. Рубан, А.И. Цвык, *Изв. вузов. Радиоэлектроника* **42 №10**, 62 (1999).
112. Г.С. Воробьев, М.В. Петровский, В.О. Журба, А.И. Цвык *Харьковская нанотехнологическая ассамблея-2007, Т.2*, 133 (Харьков: ННЦ «ХФТИ», ИПП «Контраст»: 2007).